

УГЛЕРОД В ВЫСОКОХРОМИСТОЙ МАЛОЛЕГИРОВАННОЙ ЛИТОЙ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ

Н. А. ЕРОФЕЕВ

(Представлено профессором доктором А. Н. Добровидовым)

Свойства стальных изделий определяются составом, природой, количественным соотношением и распределением фаз. Изменение этих факторов происходит при легировании или термической обработке стали. Установлению влияния температуры закалки, условий охлаждения и различных видов отпуска на природу и легированность ковальной и литой быстрорежущей стали посвящено большое количество работ.

А. П. Гуляев [1] установил зависимость состава фаз от температуры закалки ковальной стали Р18, Р9 и Р4. И. С. Кватер [2] исследовал эти же вопросы применительно к литой быстрорежущей стали стандартного и измененного состава. Е. П. Старова [3] исследовала зависимость легированности твердого раствора от температуры закалки малолегированной быстрорежущей стали с азотом.

И. И. Горюнов [4] выяснил влияние скорости охлаждения на распределение легирующих элементов между фазами литой закаленной стали Р18.

Сравнительно мало работ, в которых была бы исследована зависимость указанных факторов от содержания углерода, который является самым дешевым, но и в то же время очень важным компонентом быстрорежущей стали.

Решение этого вопроса имеет большое значение при изыскании новых сталей для инструмента и деталей машин.

Настоящая работа выполнена с целью установления влияния содержания углерода в стали на легированность фаз в закаленном, отпущенном и отожженном состояниях. Исследование проведено на трех марках высокохромистой малолегированной литой быстрорежущей стали с различным содержанием углерода (табл. 1).

Таблица 1

*Химический состав исследованных сталей и их твердость в литом
(закаленном) состоянии*

Обозначения стали	Химический состав, %				Твердость после закалки (литья) R_c
	C	W	Cr	V	
1,0-4-12-2	1,02	4,02	11,76	2,28	57
1,5-4-12-2	1,50	4,12	12,06	2,19	51
2,0-4-12-2	1,84	4,16	11,88	2,17	49

Методы исследования и обсуждение результатов

Плавки проводились в высокочастотной индукционной печи. После окончания плавки сталь раскислялась алюминием, вводимым в количестве 0,1%. Вес каждой плавки составлял 1 кг. Форма заливалась сталью непосредственно из тигля при температуре металла 1500—1540°C, контролируемой оптическим пирометром. Вследствие быстрого охлаждения при литье в металлическую форму (кокиль) образцы малого сечения закаливались.

Исследованные стали были подвергнуты металлографическому и карбидному анализам в закаленном (литом), отпущенном трехкратно при 560° и отожженном состояниях. Кроме этого, были проведены последовательный отпуск в интервале температур 100—700°C и многократный отпуск при 560°C.

Структура всех исследованных сталей в закаленном состоянии состоит из карбидной составляющей в виде тонкой сетки, остаточного аустенита и скрыто кристаллического мартенсита. Все стали в этом состоянии плохо травятся 10% раствором азотной кислоты в спирте, что свидетельствует о высокой легированности металлической основы хромом, который является основным легирующим элементом в них.

Хорошие результаты по дифференциации фаз, их распределению и выявлению внутрикристаллической неоднородности были получены при применении цветного окисления шлифов, производимого при 400—420° в течение 10—15 мин.

Для установления зависимости травимости только от природы и состава фаз все шлифы травились одновременно.

Наиболее отчетливое различие степени окисления частей зерна при переходе от центра к границам его наблюдается у закаленной стали 1,0—4—12—2 (рис. 1). На большую концентрацию хрома близ границ зерна указывает изменение цвета окисной пленки от синего в центре до светло-желтого на границе. Различие в степени окисления уменьшается

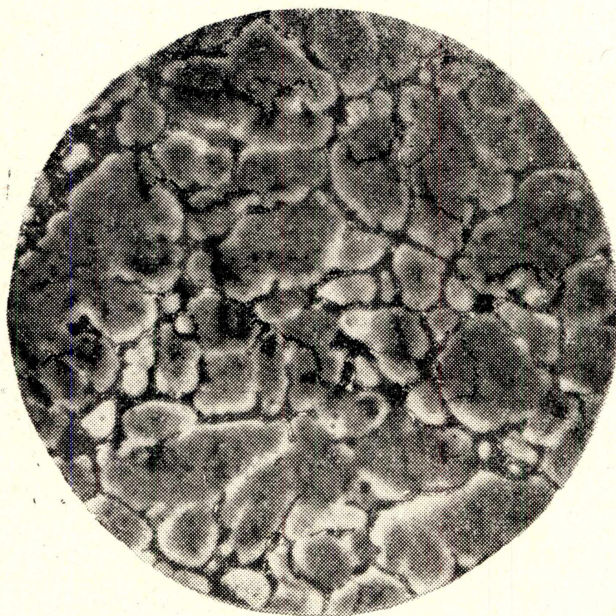


Рис. 1. Микроструктура стали 1,0—4—12—2 в закаленном состоянии. X660.

по мере увеличения содержания углерода в стали, хотя легированность твердого раствора при этом также уменьшается (табл. 2). Последнее хорошо видно на структуре стали 2,0—4—12—2 (рис. 2) и объясняется,

по-видимому, более равномерным распределением хрома в объеме зерна под действием углерода. Этот результат находится в соответствии с экспериментальными данными А. С. Завьялова и Б. И. Брука [5].

Применение цветного окисления шлифов позволило установить фазовый состав ледебурита. Во всех сталях он состоит из металлической основы синего цвета, что свидетельствует о значительном обеднении ее хромом, светлых карбидов хрома, коричневых карбидов ванадия и светло-желтых карбидов вольфрама с железом.

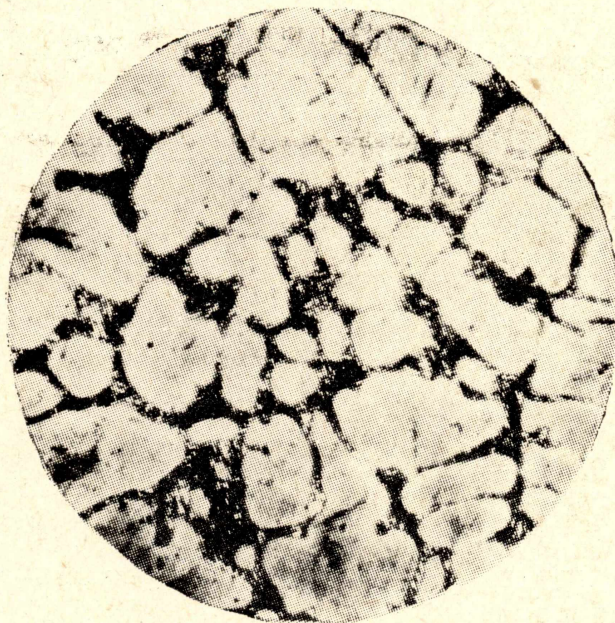


Рис. 2. Микроструктура стали 2,0—4—12—2 в закаленном состоянии. X660.

Таким образом, применение цветного окисления позволило выяснить влияние углерода на внутрикристаллическую ликвацию и определить фазовый состав первичных карбидов.

Образцы для выделения карбидов имели диаметр 10 мм и длину 60 мм. Вследствие значительной коррозионной стойкости металлической основы сталей в закаленном и отпущенном состояниях, выделение карбидных осадков производилось в химически активном электролите состава: 100 мл соляной кислоты, 10 г тиосульфата и 75 г хлористого калия на 1 л воды [6]. При использовании этого электролита происходит равномерное растворение образцов, без наличия на их поверхности остатков блестящей металлической пленки. Для выделения карбидного осадка из отожженных образцов был применен однонормальный раствор хлористого калия с добавкой 5 г лимонной кислоты на литр раствора [7]. При применении обоих электролитов растворение велось при плотности тока $0,02-0,03 \text{ а/см}^2$ и температуре $12-14^\circ\text{C}$. Время растворения: 3—4 часа для закаленных и 2—3 часа для отпущенных и отожженных образцов.

Результаты определения количества карбидов, их химического состава и распределения легирующих элементов между фазами исследованных сталей приведены в табл. 2.

Ход кривых W_p , V_p и C_p на рис. 3 указывает, что при повышении содержания углерода в стали происходит обеднение твердого раствора легирующими элементами, вследствие перехода их в карбиды. Этим же объясняется непрерывный подъем кривой количества карбидов и содержания в них легирующих элементов (W_k , V_k , C_k).

Таблица 2

Данные карбидного анализа

Обозначение плавков	% карби- дов	Химический состав осадка, %				Распределение легирующих элементов, %						*) Коэффициенты распределения		
						в карбидах			в твердом растворе			$W_p : W_k$	$Cr_p : Cr_k$	$V_p : V_k$
		C	W	Cr	V	W	Cr	V	W	Cr	V			
После закалки (литья)														
1,0—4—12—2	7,6	—	12,69	22,54	6,55	0,96	1,71	0,49	3,06	10,05	1,79	3,2	5,8	3,6
1,5—4—12—2	12,9	—	12,68	24,35	6,67	1,63	3,14	0,86	2,49	8,92	1,33	1,5	2,8	1,5
2,0—4—12—2	17,7	—	12,22	26,98	6,26	2,15	4,78	1,11	2,01	7,10	1,06	0,9	1,4	1,0
После трехкратного отпуска при 560°														
1,0—4—12—2	14,5	—	13,24	32,64	7,64	1,92	4,72	1,10	2,10	7,04	1,18	0,9	1,5	1,1
1,5—4—12—2	19,1	—	12,85	29,61	6,86	2,44	5,65	1,31	1,68	6,41	0,88	0,6	1,1	0,7
2,0—4—12—2	18,9	—	11,89	26,35	5,97	2,24	5,17	1,13	1,92	6,71	1,04	0,8	1,3	0,9
После отжига														
1,0—4—12—2	17,3	6,19	13,07	38,51	7,57	2,25	6,66	1,31	1,77	5,10	0,97	0,8	0,8	0,7
1,5—4—12—2	22,1	6,84	14,27	37,44	7,30	3,16	8,26	1,61	0,96	3,86	0,58	0,3	0,4	0,3
2,0—4—12—2	25,6	7,40	12,84	37,63	6,57	3,37	9,63	1,68	0,79	2,25	0,49	0,2	0,2	0,3

*) р — доля элемента в твердом растворе,
к — доля элемента в карбидном осадке.

Переход легирующих элементов в карбиды обуславливается большим химическим сродством их с углеродом, чем с железом. Сильнее всего твердый раствор обеднился ванадием и вольфрамом и в меньшей степени — хромом. Чем меньше сродство элемента с углеродом, тем

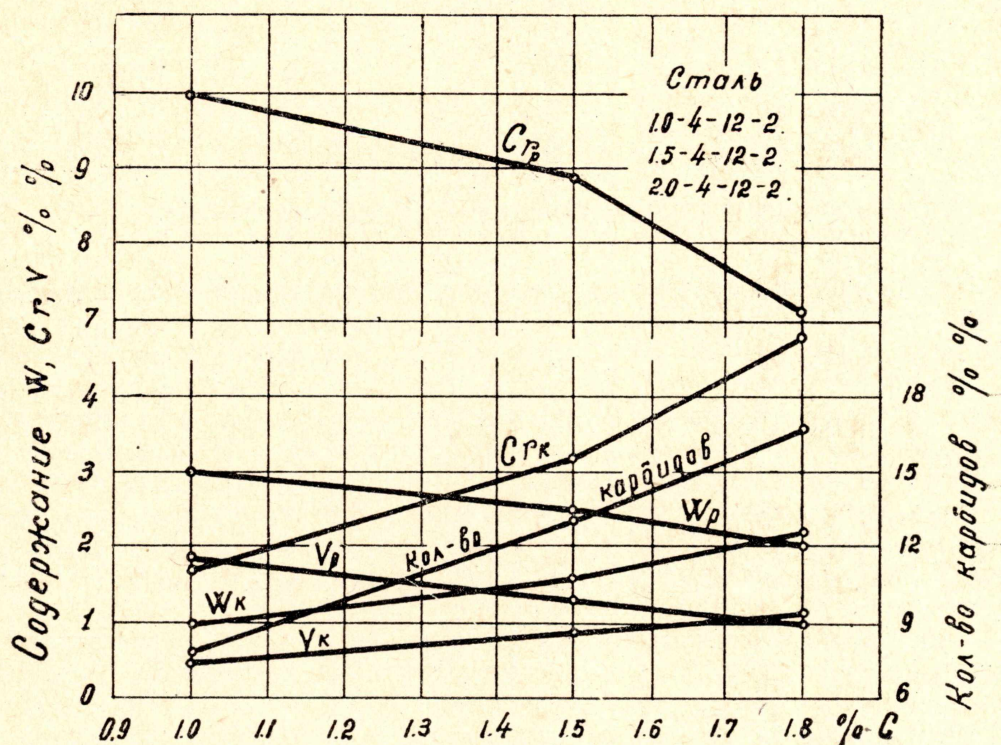


Рис. 3. Зависимость количества карбидов, легированности твердого раствора и карбидов закаленной стали от содержания в ней углерода.

в меньшей степени происходит и обеднение твердого раствора этим элементом. Это подтверждается сравнением отношений концентраций легирующих элементов в карбидном осадке ($W_{ко}$, $V_{ко}$, $Cr_{ко}$) к концентрации их в твердом растворе ($W_{тр}$, $V_{тр}$, $Cr_{ко}$). С увеличением концентрации углерода в стали эти отношения увеличиваются после закалки и после отжига (табл. 3).

Таблица 3

Влияние содержания углерода на отношения концентраций легирующих элементов в карбидном осадке к концентрациям в твердом растворе

Обозначение стали	$W_{ко} : W_{тр}$	$Cr_{ко} : Cr_{тр}$	$V_{ко} : V_{тр}^*)$
После закалки (литья)			
1,0—4—12—2	4,2	2,25	3,6
1,5—4—12—2	5,2	2,7	5,1
2,0—4—12—2	6,0	3,9	6,2
После трехкратного отпуска при 560°			
1,0—4—12—2	6,3	4,6	6,3
1,5—4—12—2	7,5	4,6	8,5
2,0—4—12—2	6,0	4,0	5,9

Обозначение стали	$W_{\text{ко}} : W_{\text{тр}}$	$Cr_{\text{ко}} : Cr_{\text{тр}}$	$V_{\text{ко}} : V_{\text{тр}}^{*)}$
После отжига			
1,0—4—12—2	7,2	7,4	7,6
1,5—4—12—2	14,9	9,6	12,1
2,0—4—12—2	18,5	16,7	13,2

*) ко — концентрация легирующего элемента в карбидном осадке,
тр — концентрация легирующего элемента в твердом растворе.

Эти отношения также показывают, что растворимость в твердом растворе хрома, обладающего меньшим сродством с углеродом, чем вольфрам и ванадий, больше растворимости вольфрама и ванадия. Так, концентрация хрома в твердом растворе после закалки в среднем в 2,5—4 раза, а после отпуска в 4,5 раза меньше, чем его концентрация в карбидном осадке. Содержание же вольфрама и ванадия в твердом растворе после закалки и после отпуска в четыре и более раза меньше, чем в карбидах. В отожженном состоянии растворимость в твердом растворе хрома, вольфрама и ванадия примерно одинакова. Анализ карбидного осадка отожженных сталей на углерод показал, что он весь находится в карбидах (табл. 2).

Приведенные отношения концентраций, а также коэффициенты распределения (табл. 2) характеризуют влияние содержания углерода в стали на перераспределение легирующих элементов между фазами при отпуске. Сравнение указанных отношений для закаленного состояния и после отпуска показывает, что с повышением содержания углерода в стали уменьшается степень обеднения твердого раствора легирующими элементами. Это отчетливо видно, если сравнить коэффициенты распределения легирующих элементов для сталей 1,0—4—12—2 и 2,0—4—12—2 (табл. 2). Коэффициенты распределения первой стали уменьшились для вольфрама с 3,2 до 0,9, для хрома с 5,8 до 1,5 и для ванадия с 3,6 до 1,1. Эти же коэффициенты стали 2,0—4—12—2 после отпуска и до него не отличаются между собой. Это подтверждается и тем, что с увеличением содержания углерода в стали уменьшается разница между концентрацией легирующего элемента в закаленном твердом растворе и в твердом растворе после отпуска (рис. 4). Параллельно с этим уменьшается и количество вторичных карбидов после отпуска.

Уменьшение степени обеднения твердого раствора легирующими элементами после трехкратного отпуска при 560° доказывает повышение устойчивости остаточного аустенита, а снижение твердости стали после закалки (табл. 1) свидетельствует об увеличении количества его при введении углерода в сталь.

Увеличение количества остаточного аустенита связано с понижением температуры начала мартенситного превращения под действием углерода, растворяющегося в твердом растворе. При этом действие дополнительно растворившегося углерода в аустените на снижение температуры начала мартенситного превращения более эффективно, чем ее повышение за счет суммарного снижения концентрации всех легирующих элементов в аустените. Например, общее снижение легированности аустенита стали 2,0—4—12—2 по сравнению со сталью 1,0—4—12—2 составляет $1,05\% W + 2,95\% Cr + 0,73\% V = 4,73\%$. Это должно повысить температуру начала мартенситного превращения стали 2,0—4—12—2. Однако увеличение содержания углерода в стали 1,0—4—12—2 на

0,82% (сталь 2,0—4—12—2), часть которого растворяется в аустените, снизило температуру начала мартенситного превращения по сравнению с ее начальным положением.

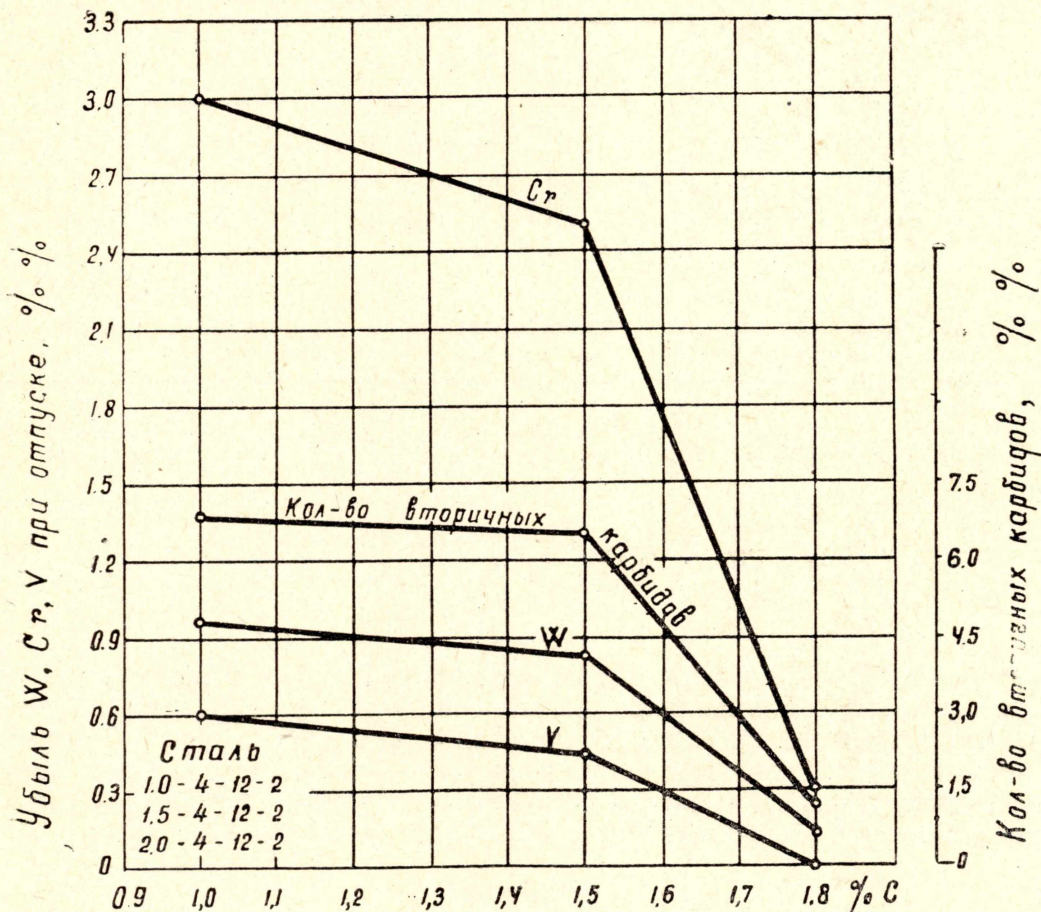


Рис. 4. Степень обеднения твердого раствора легирующими элементами при отпуске в зависимости от содержания углерода в стали.

Повышение устойчивости остаточного аустенита можно объяснить прямым и косвенным действием углерода. Прямое действие можно связать с тем, что, находясь в твердом растворе, углерод задерживает диффузионные процессы, сопровождающие выделение вторичных карбидов при отпуске. Последнее возможно только при увеличении межатомных сил связи в решетке аустенита. Косвенное действие углерода можно отнести за счет уменьшения количества мартенсита, который способствует более быстрому распаду аустенита [8]. Считается, что, чем больше в стали мартенсита, тем быстрее распадается остаточный аустенит. Таким образом, ответственным за увеличение количества и повышение устойчивости остаточного аустенита всецело является углерод. Обе из указанных характеристик находятся в прямой зависимости от концентрации углерода в аустените.

Изменение твердости при многократном отпуске (табл. 4), величина вторичной и максимальной твердости и им соответствующая температура при последовательном отпуске (табл. 5) подтверждают результаты фазового анализа. Эти данные также показывают, что с повышением содержания углерода в стали и соответственно в закаленном твердом растворе устойчивость и количество остаточного аустенита увеличивается. Например, твердость стали 2,0—4—12—2 после трехкратного

Таблица 4

Изменение твердости стали при температуре отпуска 560°

Обозначение стали	R_c после закалки	R_c после отпуска									
		кратность отпуска									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0—4—12—2	57	63	60	55	53	52	52	50	50	49	49
1,5—4—12—2	51	53	56	60	61	60	59	58	58	58	57
2,0—4—12—2	49	47	47	48	48	49	57	57	57	57	57

Таблица 5

Величина вторичной и максимальной твердости и им соответствующая температура при последовательном отпуске сталей

Обозначение стали	Максимальная твердость, R_c	Температура максимальной твердости, °C	Значение вторичной твердости, R_c
1,0—4—12—2	62	575	5
1,5—4—12—2	63	600	12
2,0—4—12—2	61	650	12

отпуска при 560° не изменилась по сравнению с закаленным состоянием, поэтому почти не изменились и коэффициенты распределения легирующих элементов. Этот же отпуск сталей (1,0—1,5)—4—12—2 привел к значительным структурным изменениям — в той и другой стали твердость достигла максимального значения — поэтому в значительной мере произошло перераспределение легирующих элементов (рис. 4).

Выводы

Полученные в настоящей работе экспериментальные данные свидетельствуют о следующих закономерностях:

1. Увеличение содержания углерода в стали приводит к непрерывному обеднению твердого раствора вольфрамом, хромом и ванадием после закалки и после отжига. При этом количество карбидов и содержание в них легирующих элементов непрерывно увеличиваются.

2. Увеличение количества и повышение устойчивости остаточного аустенита находится в прямой зависимости от концентрации углерода в нем.

3. При перераспределении легирующих элементов в процессе трехкратного отпуска при 560° в наибольшей степени обедняется легирующими элементами твердый раствор (аустенит) с наименьшей концентрацией в нем углерода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А. П. Сталь, № 3, 1946.
2. Кватер И. С. Литые быстрорежущие стали. Машгиз, 1952.
3. Старова Е. П. Малолегированные быстрорежущие стали с азотом. Машгиз, 1954.
4. Горюнов И. И. Отливка инструмента в металлические формы. Литой и наплавленный инструмент. Сб. статей, Машгиз, 1951.
5. Завьялов А. С. и Б. И. Брук. Физика металлов и металловедение, т. 8, в. 3, 1959.
6. Лашко Н. Ф., Еремин Н. И. Фазовый анализ и структура аустенитовых сталей. Машгиз, 1957.
7. Попова Н. М. Карбидный анализ. Машгиз, 1949.
8. Юшкевич П. М. Журнал технической физики, т. 24, в. 4, 1954.